

薬液浸透注入の限界と超多点工法

著者	飛田 善雄, 岡田 和成, 那須 丈夫
雑誌名	東北学院大学環境防災工学研究所紀要
号	11
ページ	74-83
発行年	2000-03-25
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00024573/

薬液浸透注入の限界と超多点工法

東北学院大学工学部土木工学科 飛田 善雄

東北学院大学工学研究科土木工学専攻 岡田 和成

日本基礎技術株式会社 那須 丈夫

1. はじめに

薬液注入工法は、地盤改良工法の一つである。薬液により固結された地盤は、止水性、剛性、強度に改良が見られる。本工法は、これまで主として仮設構造物の補強、掘削やトンネルの止水工事に利用されてきた。その利用が改良効果期間が限定される仮設目的に限られていたために、この工法に関する基礎的理論の構築、適用性の限界などに関する研究は十分ではない。

薬液注入工法は、軽便な施工機械で地盤改良を行えるのが一つの大きな利点である。都市部において、地盤の耐震性向上を目的とした永久的地盤改良を行う場合に、狭い空間のみが許容されることになる。このような目的においては、ほぼ唯一の工法となる。薬液注入工法における問題としては、注入中に地盤内に割裂が発生し、注入状況が浸透注入より脈状注入に移行し、薬液が偏在したまま固結し、予定領域の地盤改良が行われないことが挙げられる。

ある程度の割裂を許しながらも、地盤全体としては浸透注入が卓越するような工法を開発できれば、薬液により固結した土は、良好な工学的性質を有することより、その適用範囲は大きく広がる（土質工学会、1993；島田他、1989）。この様な目的で超多点工法が開発された（那須、1997）。その工法の有効性を示すためには、浸透注入の限界と割裂の許容範囲に関して、正確な知識をもつことが必要になる。

本報告では、浸透理論に基づく解析を行うことにより、浸透注入を卓越させるための条件を示し、その条件は超多点注入工法の特長と一致することを明らかにする。室内実験および現場実験の結果を浸透解析に基づいて考察し、ある透水係数を有する地盤に対して許容される注入速度（以下、許容注入速度と呼ぶ）の計算方法を提示する。また、現場においては、許容注入速度は室内実験の10倍程度になるという結果についても考察する。

2. 浸透理論と薬液浸透注入の解析

浸透注入の基礎であり、割裂発生条件を議論する上で重要な浸透理論を議論しておく。空隙を有する固体（その空隙率を n と表す）の中の液体の流れは、その流れが速くない場合には、浸透理論が適用できる。浸透理論においては、基本的微分方程式は、液相の質量保存則（式(1)）である。固相の非圧縮性、液体の非圧縮性を仮定し、さらに間隙流体の流れは等方性を仮定したダルシーの法則（式(2)）に従うものとするれば、式(3)に示すラプラスの方程式が得られる（詳しくは、Bear(1987)参照）。

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w v_1)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w v_2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w v_3)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$q_i = -k \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (q_i = n v_i) \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

ここに、 v_i は液体の速度、 h は水頭、 q_i は断面全体を間隙流体が流れるとした場合の見かけの速度である。

上記直交デカルト座標系における微分方程式を、球座標系、円筒座標系において表現し、さらに球対称条件および軸対称条件を与えると、以下の半径 r に関する常微分方程式となる。

$$\text{球状注入：} \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rh) = 0 \quad (4)$$

$$\text{円筒状注入：} \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

これらの式を基礎として、図-1 に示すような条件のもとで、球対称および軸対称条件が満足された場合の薬液注入の水頭分布 $h(r)$ は次式で与えられることになる。

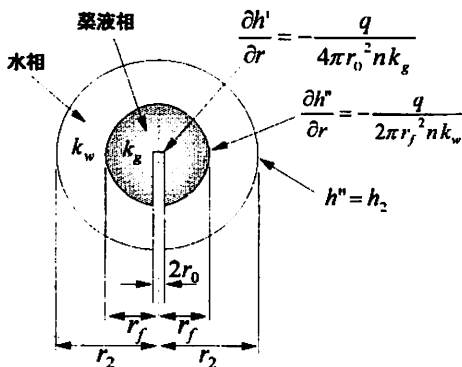


図-1a 球状注入の境界条件

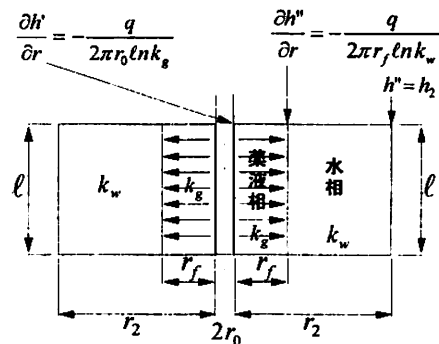


図-1b 円筒状注入の境界条件

$$\text{球状注入： } h(r) = h_2 + \frac{q}{4\pi m k_g} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_f} \right) + \frac{q}{4\pi m k_w} \left(\frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (6)$$

$$\text{円筒状注入： } h(r) = h_2 + \frac{q}{2\pi \ell n k_w} \ln \left(\frac{r_2}{r_f} \right) + \frac{q}{2\pi \ell n k_g} \ln \left(\frac{r_f}{r} \right) \quad (7)$$

ここに、 k_g は薬液の（粘性の影響を含む）水理学的伝導係数（以下、混乱は生じないので、薬液の場合も透水係数と呼ぶことにする）である。 k_w は透水係数、 r_f は薬液が到達した半径、 r_0 は注入管半径、 ℓ は改良深さである。

この式を基礎として、Mathematica を用いたパラメトリックスタディーを行うことにより、水頭分布および動水勾配の変化を計算し、浸透注入が卓越するための条件を考察した。ここでは、注入管圧力がある限界圧に等しいという条件より求めた（割裂発生条件に対する考察は、第5章において詳述する）。その結果、ある透水係数をもつ地盤に対して使用薬液が決定された場合、次のような条件が満たされた場合に、注入管圧力を限界圧以下におさえることができる：

- 1) 注入速度を低く押さえること
- 2) 改良予定半径を小さく押さえること
- 3) 注入管半径を大きくすること

浸透注入を目的とした場合、薬液は長いゲルタイムを有するものとなり、さらに、粘性係数は低いことが要求される。また、永久改良を目的とした場合には、耐久性に優れた薬液が使用される。上記1), 2)の条件を満足する薬液注人工法として、超多点工法が開発された。超多点工法の概要は第4章において述べる。

3. 割裂発生条件に関する室内実験

室内実験に用いた実験装置の概要を図-2 に示す。供試体として、表-1 に示す物性を有する二つの試料を用いた。砂質シルトを試料A、シルト質砂を試料Bと表現する。所定の方法により注入槽内に砂を締固めた後、注入槽上部のエアチュ

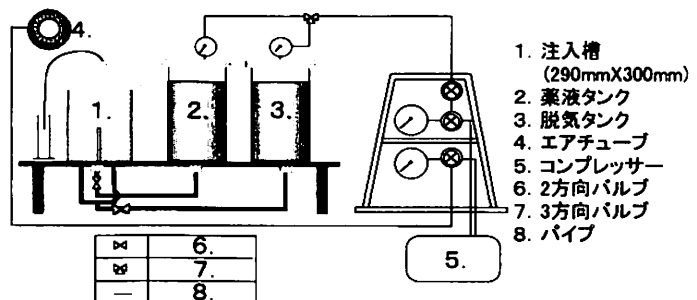


図-2 実験装置の概要

ープに空気圧を与え、供試体に上載圧力を与えた。事前のキャリブレーションによって得られた換算式を用いて、その圧力を計算した。注入槽内を飽和させた後、水を用いて注入試験を行った。実験は定圧注入で行った。19.6kPaより、注入を開始し、圧力増分を19.6kPa 毎に、注入量 100cm³ に達するのに必要な時間(sec)を計測した。

浸透注入となっている注入圧力の低い範囲で、浸透解析の解を利用して、透水係数を逆算した。試料 A の透水係数は 7×10^{-4} (cm/sec) ,

試料 B の透水係数は、 5×10^{-3} (cm/sec) と求められた。本文では、注入速度の単位として、現場で利用される (l/min) を用いる。(cm³/sec) に換算するためには、(50/3) の換算係数を乗じることになる。

圧力 P (kPa) と注入速度 q (l/min) の関係を求め、注入速度が急増する点を割裂圧と判断した。実験結果を図-3 (試料 A) および図-4 (試料 B) に示す。この実験による主要な結果は以下の通りである。

1) 上載圧力 (拘束圧) が大きいほど、試料 A および試料 B 共に、割裂圧は大きくなる。これは砂骨格の強度が大きくなるために、浸透破壊が生じにくくなったためと考えられる。

2) 本実験においては、およそ 150kPa から、300kPa が割裂圧であり、そのときの注入速度は、0.3-0.6 (l/min) となっている。

本実験結果に対する考察は、現場実験と合わせて、第 6 章で行う。

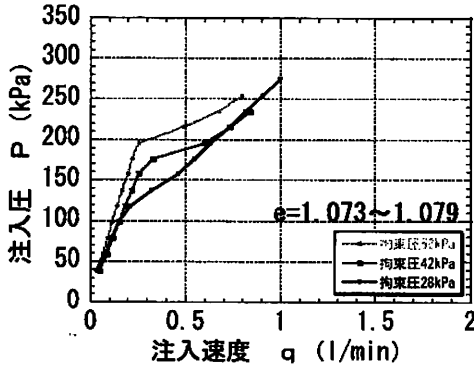


図-3 P-q 曲線 (試料 A)

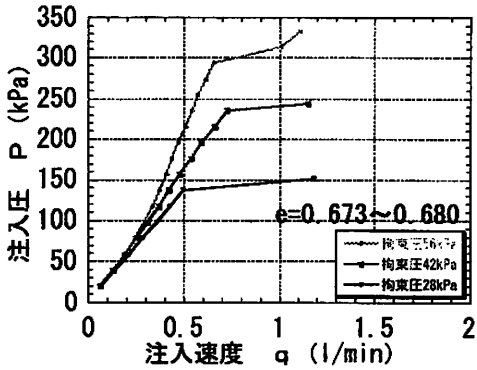


図-4 P-q 曲線 (試料 B)

表-1 試料の物性

試料A		試料B	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.629	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.644
有効径 D10 (mm)	0.03	有効径 D10 (mm)	0.09
D30 (mm)	0.04	D30 (mm)	0.13
D50 (mm)	0.05	D50 (mm)	0.14
D60 (mm)	0.06	D60 (mm)	0.15
均等係数 U_c	2.47	均等係数 U_c	1.67
曲率係数 U_c'	1.04	曲率係数 U_c'	1.16
粗砂分 (%)	0.40	粗砂分 (%)	0.52
細砂分 (%)	30.80	細砂分 (%)	95.25
シルト分 (%)	66.30	シルト分 (%)	4.13
粘土分 (%)	2.50	粘土分 (%)	0

4. 超多点工法を用いた現場実験

超多点注入工法を用いて、現場実験を行った（那須、1999）。超多点工法の詳細は那須（1997）により報告されている。超多点注入工法は従来工法と異なり、注入管 1 本当たりの改良半径を小さくし、多数の注入管を設置し、1 本当たりの注入速度を低くしても、経済的な注入が実施できるように開発された工法である。このような注入方法が、浸透注入が卓越する条件（第 2 章参照）と一致しているのは

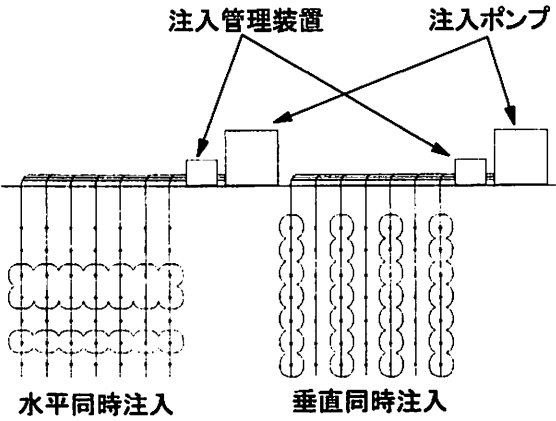


図-5 超多点注入工法の概念図

明白である。また、図-5 にその例を示すように、多数の注入管を用いてその注入順序を変化させることにより、より改良効果の高い注入方法を選定することができるのも本工法の利点である。この目的のために、注入ポンプから、注入圧力、注入量の管理手法まで数多くの技術的困難を克服した。

現場実験は、図-6 に示す砂質シルト地盤を対象に実施された。対象土量は 96m³、間隙率は 40(%) とし、36 本の注入管を用いて一本当たり 955(l) の注入量となっている。

事前の水押し注入により判断して、最大注入速度は 2.0(l/min) 程度を目標とした。使用薬液は、パーマロック ASF-6 であり、浸透性に優れた恒久的効果を目的とした薬液である。薬液注入時の典型的な注入圧力 P と注入速度 q の時間的変化を図-7 に示す。

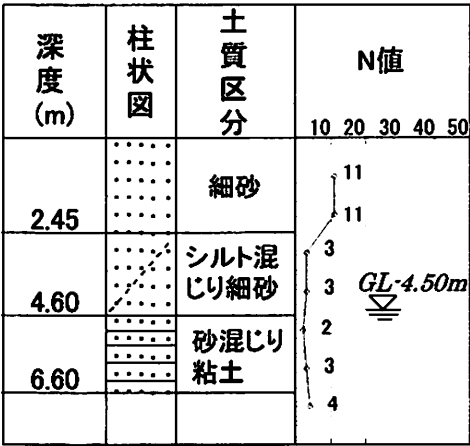


図-6 現場土性図

注入圧力 P は 350kPa 程度まで上昇し、注入速度は 2.2(l/min) 程度となっている。これは、室内実験と比較すると、注入圧力はほぼ同程度であるのに、注入速度は 10 倍程度となっている。この差異については、第 6 章において、浸透解析結果を基礎として考察する。

注入後2週間養生した後、改良地盤を掘削し、その固結状況を観察し、各種物理・力学試験を行った。注入管まわりにおいても、脈状注入は見られず、浸透注入が卓越した良好な注入であった。

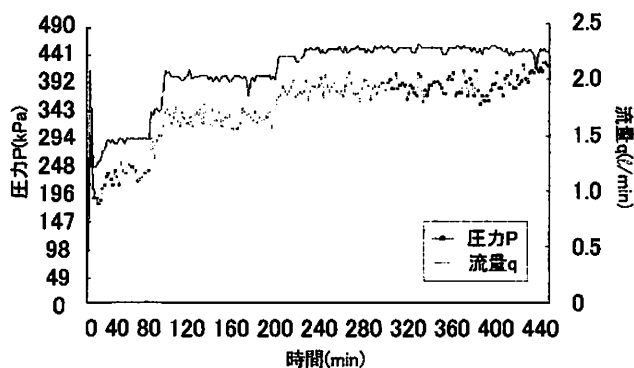


図-7 現場注入データ (924)

5. 比較的透水係数が高い場合の砂質地盤における割裂発生

薬液注入に限らず、注入工法一般において、注入中の割裂発生と割裂先端クラックの不安定な進展より、グラウトや薬液は脈状注入となる。その割裂発生の条件と脈状注入のメカニズムは、地盤の強度、透水性により異なったものと考えられる。

図-8 に割裂発生メカニズムの概念図を示す（飛田、1993）。横軸に透水性、縦軸に注入圧を取っている。透水性が低く、注入圧力が高い場合には、割裂を発生させるメカニズムは、水圧破碎型で、基本的には、間隙に押し込まれた注入圧により、岩盤内のクラックが不安定に進展し、割裂さらに脈状注入をもたらすことになる。このような場合の割裂現象は、岩盤グラウトの分野で鋭意研究されている。

比較的透水係数が高く（透水係数として、 $10^{-3}(\text{cm/sec})$ 以上）、土骨格の粘着力も大きくない砂質土の場合には、次のような割裂のメカニズムが妥当と考えられる。間隙を流れる流体が土骨格に作用する‘浸透力’により、土骨格を崩壊させ、より速い流れとなり、

土粒子を運び出すパイピングが割裂発生の基本的原因と考えられる。この場合、浸透力 f_i は動水勾配 i_i に対して、 $f_i = i_i \gamma_w$ の関係が存在するので、動水勾配の大きさがこの場合の割裂現象を支配する基本的パラメータと考えられる。

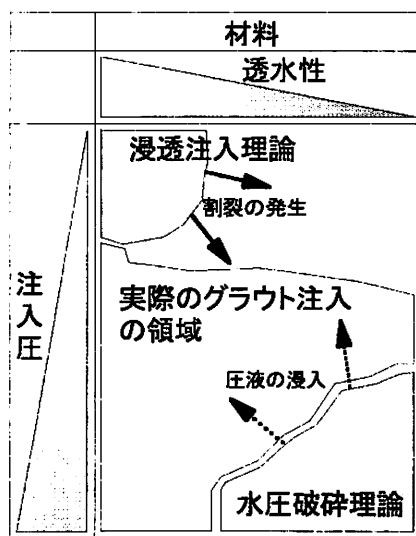


図-8 割裂発生メカニズム

注入管の周囲に、地盤全体の改良効果には影響を与えないような範囲での割裂許容半径 (r^*) を設けると、注入の管理基準は、次のように表現できることになる。

「割裂許容半径 r^* において、浸透破壊を生じる限界動水勾配 i_{cr} と一致する許容注入速度以下で注入を行えば、浸透が卓越する注入を行うことができる。」

この条件を、球対称条件で得られた式より、動水勾配の式を求め、上記条件を代入する。さらに最も注入圧が高くなる予定改良半径に達した時を対象として、許容注入速度 q_{al} と地盤の透水係数 k_w を求めると、次式のようになる：

$$q_{al} = 4\pi n i_{cr} r^{*2} \alpha k_w \quad (8)$$

ここに $\alpha = k_g/k_w$ と定義している。

現場においては、注入流量と注入圧により管理するのが普通であるから、注入圧を限定し注入限界圧と呼び、 h_{cr} と表現すると、改良半径に達した時点を対象として、地盤の透水係数に対する許容注入速度を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} q_{al} &= h_{cr} k_w / \beta \\ \beta &= \frac{1}{4\pi n} \left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_f} \right) + \left(\frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_2} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

両者共に、許容注入速度は、地盤の透水係数と線形関係となる。このことは、現場で限界注入圧以下になるように注入量を決定することは、浸透破壊を基本的メカニズムとする規準と同等のものとなっていることを意味している。

6. 室内実験と現場実験の許容注入速度の差異に関する考察

現場実験の透水係数 ($k=1 \times 10^{-3}(\text{cm/sec})$ と設定する) と同程度の透水係数を有する試料 A について比較する。

試料 A に対する室内実験では、割裂圧は平均 150kPa、許容注入速度は、平均 0.3(l/min) であった。一方、現場実験においては、2.2(l/min) 程度であっても、掘削後の観察によれば、脈状注入は見られず満足すべき改良効果となっている。この差異について、浸透解析を利用して考察を

行う。

どのような注入であれ、注入管周囲においては、動水勾配が大きく、小規模な浸透破壊が発生することは避けられない。前章で論じたように、割裂発生条件をある半径での限界動水勾配で定義しても、注入管圧力で定義しても、その規準は同等のものとなるから、ここでは、注入管における限界圧で議論する。

割裂が発生した場合、その部分の透水係数は、著しく低下し、水頭の損失は小さいものと考えられる。この状況は、見かけの注入管半径を大きくとることにより、近似的に表現できる。透水係数を室内実験で得られた $7 \times 10^{-4} (\text{cm/sec})$ とすると、 $0.3 (\text{l/min})$ で、 150kPa 程度の割裂圧とするためには、 r_0 を $0.5 (\text{cm})$ 程度、現場において観察された $2.0 (\text{l/min})$ 程度で 300kPa 程度の注入圧とするためには、透水係数を $1 \times 10^{-3} (\text{cm/sec})$ とし、 $r_0 = 2.5 (\text{cm})$ と設定すれば再現できる。この見かけの注入管半径を、それぞれ固定し、地盤の透水係数と許容注入量の関係を計算したのが、図-9 である。原点を通る直線関係となるが、その傾きは大きく異なる。

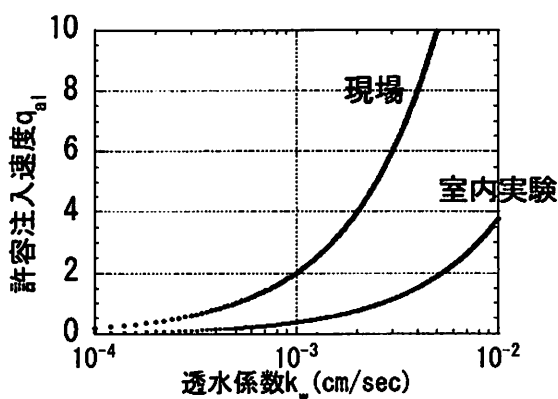


図-9 q_{a1} - k_w 関係

この結果を考察すると、室内実験においては、浸透注入より割裂浸透への遷移点を割裂と判断していることになり、現場実験においては、ある程度割裂浸透領域に入った状態で注入が行われたことになる。現場注入実験においては、掘削して改良効果を確認したところ、脈状注入は観察されなかった。このことは、注入管近傍領域において割裂浸透状況に至ると判断されても、工学的には問題のない注入が行えることを意味している。

室内実験によれば、割裂浸透の場合の透水係数は浸透時の 10 倍程度のものと推定され、ここでの近似計算（割裂領域は透水係数無限大）とは異なる。割裂浸透領域の透水係数が有限であるという事実は、注入管より、割裂領域、薬液浸透領域、水領域と 3 つの異なる領域を設定し、その浸透解析を行うことにより再現できる。割裂領域の範囲は、見かけの注入管半径を設定するという近似計算よりも、大きく計算されることになる。しかし、地盤の間隙率、透水係数の測定精度などを考えると、その差異は工学的には問題にならない。

透水係数が $1 \times 10^{-4} (\text{cm/sec})$ 程度の地盤では、割裂浸透領域をある程度に押さえ、浸透注入を

卓越させるためには、注入速度は1 (l/min)を越えない範囲での注入が必要となり、通常注入では経済性の点で問題となる。また、地盤強度の確保を必要とする場合には、薬液濃度は増加し、その結果粘性が増加する。この場合には、 1×10^{-3} (cm/sec) 程度の透水係数を有する地盤であっても、過剰な割裂発生を防ぐためには、低い注入速度が必要となり、やはり通常注入では困難になる。

7. 結論

薬液注入により地盤改良効果を確保するためには、空隙部分に薬液が偏在することなく、均等に充填されることが必要である。そのためには、できる限り割裂を発生させず、浸透注入を卓越させることが必要になる。浸透注入を達成するための条件を浸透解析により求め、その条件を満足する工法として超多点工法が開発され、実証実験が進んでいる。本工法の有効性を確認するために、室内実験と現場実験を行い、その結果と浸透解析を比較することにより、以下の結論を得た。

1) 浸透解析を行い、浸透条件が卓越するための条件を求めた。

2) 割裂発生条件を検討するために、試料物性と拘束圧を変化させた定圧水押し注入実験を行い、試料A(砂質シルト)に対しては、割裂圧は150kPa、許容注入速度は0.3(l/min)程度の値が得られた。一方試料B(シルト質砂)に対しては、割裂圧は200kPa、許容注入速度は0.6(l/min)であった。割裂圧は拘束圧の増加と共に増加することもわかった。

3) 現場実験においては、注入圧350kPa、注入速度2.2(l/min)程度でも、2週間の養生後掘削し、その改良効果を確認したところ、浸透注入が卓越した均質な改良地盤が得られた。

4) 現場において、許容注入速度が室内実験と比較して1桁高いものであっても、満足すべき改良地盤が形成されるという結果を考察するために、浸透解析を行った。注入管まわりに割裂が発生して、その割裂領域の透水係数は無限大と設定し、見かけの注入管半径が大きくなるという考えのもとに、数値計算を行った。実際の注入管半径0.4(cm)に対して、2.5(cm)程度の見かけの注入管半径で、現場の状況に合った注入速度と注入圧の関係が得られた。

5) 以上の結果より、室内における小規模土槽実験において得られる割裂圧と許容注入速度は、浸透から割裂浸透への遷移条件を与えるものであり、現場実験において観察される注入圧力と注入速度は、注入管周囲に割裂浸透領域が発生していることを示唆している。

参考文献

Bear, J. (1988) : Dynamics of fluids in porous media, Dover Pub.

土質工学会(1993) : 薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム、発表
論文集

島田峻介他 (1989) : 最先端技術の薬液注入工法、理工図書

那須丈夫 (1998) : 「超多点注入工法」、日本基礎技術技術論文集、pp. 53-62

飛田善雄 (1993) : 薬液注入の割裂発生条件に関する基礎的研究、財団法人青森県工業技術教育
振興会平成 5 年度委託研究報告書

那須丈夫 (1999) : 超多点注入工法－現場試験注入報告書、日本基礎技術社内資料